

Magma Odalı Yavaş Yayılan Okyanus Ortası Sırtlarda Isı Modellemesi

Thermal Modeling of Slow-Spreading Mid-Ocean Ridges in the Presence of Magma Chamber

*DOĞA DÜŞÜNÜR-DOĞAN¹, JAVIER ESCARTIN²

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 34469-Maslak-İstanbul

²Equipe de Géosciences Marines, IPGP 1, rue Jussieu, 75238 Paris Cedex 05 - France

Geliş (received) : 05 Eylül (September) 2011

Kabul (accepted) : 23 Mart (March) 2012

ÖZ

Orta Atlantik sırtının yavaş yayılan Lucky Strike segmentinde keşfedilen magma odası, yavaş yayılan okyanus ortası sırtlarında duraylı olabilecek magma odalarının varlığını denetleyen parametrelerin araştırılabilmesi için bir motivasyon olmuştur. Bu çalışma kapsamında, segmentteki magma odasından kaynaklanan sıcaklığı 3-boyutlu modelleyebilmek için sonlu farklar yöntemini kullandık. Okyanus ortası sırtlarının sıcaklık yapısını denetleyen ana etmenlerden, toplam magma girdisi, magma giriş geometrisi ve hidrotermal soğuma değişkenlerini kullanarak, Lucky Strike segmentinde magma odasının varolabilme koşullarını araştırdık. Sonuçlar, magma odalarının duraylı olabilmesini denetleyen ana faktörün magma giriş geometrisi olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca magma odasının varlığı ve hidrotermal soğumanın etkisi eşsıcaklık eğrilerinde yüksek sıcaklık gradyanı izlenmesine neden olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Okyanus ortası sırtı, eksenel magma odası, ısıl modelleme

ABSTRACT

The discovery of an axial magma chamber (AMC) at the slow-spreading Lucky Strike segment of the Mid-Atlantic Ridge gives a motivation to further investigate the parameters that control the presence of an AMC, and its long term stability or temporal variability. To constrain the temperature distribution due to the presence of an AMC in the Lucky Strike segment, we used a 3-dimensional finite difference model. The thermal state of ridge segments is predominantly influenced by the rate of the magma supply, the magma input geometry and the efficiency of hydrothermal circulation. By varying those parameters, we constrained thermal conditions which allow for the presence of AMCs at Lucky Strike. Numerical modeling shows that only the geometry of magmatic input can provide conditions to produce a durable AMC. Interplay between the AMC and the hydrothermal system results in a three-dimensional steep thermal gradients.

Keywords: Mid-ocean ridge, axial magma chamber, thermal modeling

GİRİŞ

Lucky Strike (LS) segmenti, yavaş yayılan Atlantik Ortası Sirtında, $\sim 37^{\circ}20'K$ konumunda yer almakta ve Azore sıcak noktasının yakınında bulunmaktadır. 1992 yılında yapılan FAZAR gemi çalışmalarıyla (Langmuir ve diğ., 1992; Fouquet ve diğ., 1994), LS segmentinde hidrotermal su çıkışları keşfedilmiş ve bunun ardından bölge volkanik ve tektonik yapısının anlaşılabilmesi ve bu yapının hidrotermal su çıkışlarıyla ilişkilendirilebilmesi amacıyla pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Segment, bu sayede Atlantik Okyanus Ortası sırtında en çok bilimsel çalışma yapılan alan olma ünvanına sahiptir. LS segmentinde daha önce yavaş yayılan okyanus ortası sırtlarda keşfedilmemiş olan aksenal magma odası (EMO) bulunmuştur. Magma odaları, okyanus ortası sırtlarındaki sıcaklık dağılımını ve okyanus kabuğu oluşumunu denetleyen önemli bileşenler olarak bilinmektedirler. Yavaş yayılan okyanus ortası sırtlarında beklenmeyen ve klasik sıcaklık dağılımlarıyla temsil edilemeyen EMO'yu oluşturan koşulların anlaşılabilmesi büyük önem taşımaktadır.

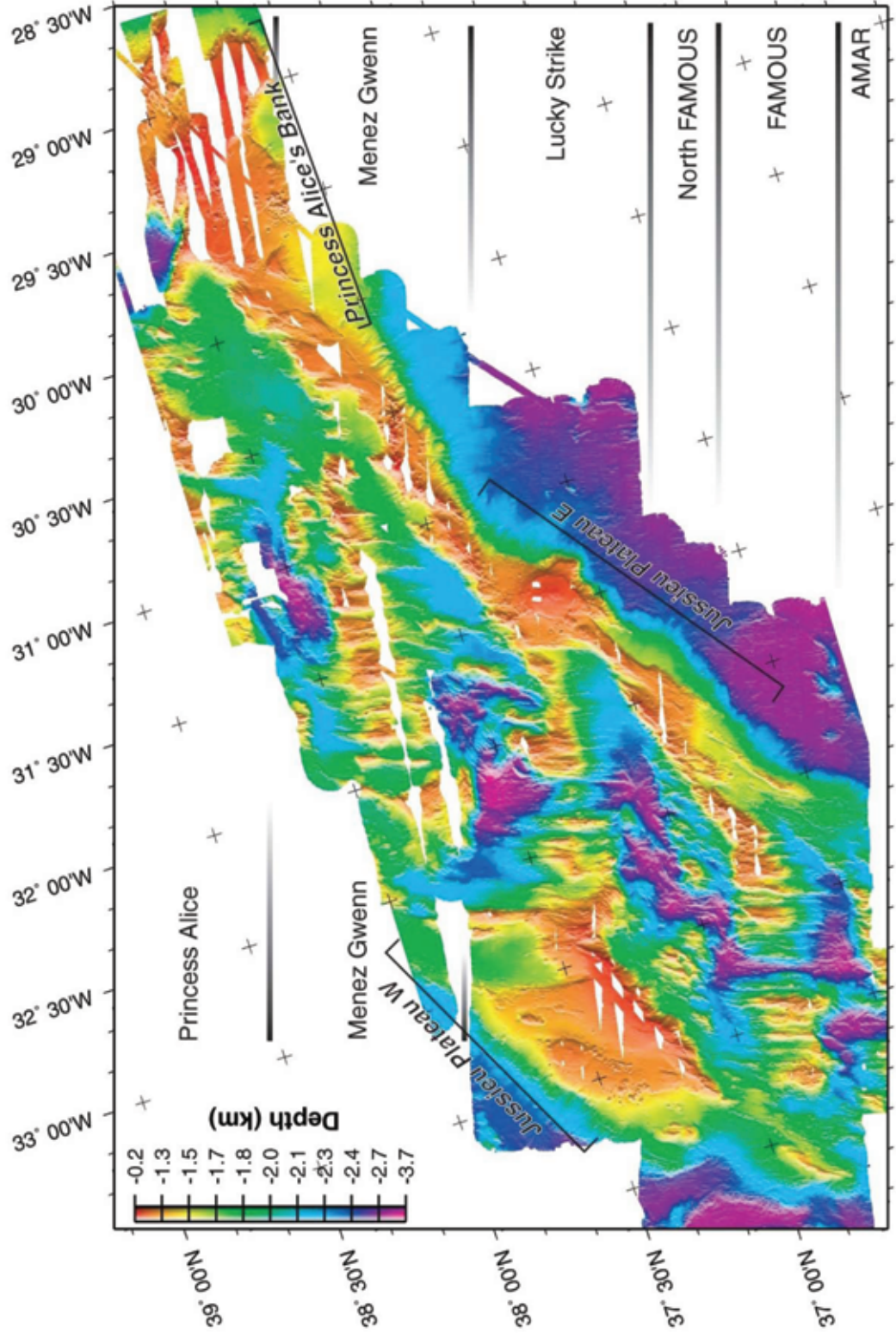
Okyanusal litosferin oluşumunu ve yapısını açıklamaya yönelik olarak yapılan sıcaklık modelleri, okyanus ortası sırtına sağlanan magmanın yaklaşık olarak 6 km kalınlığındaki okyanusal kabuğu oluşturmaya yetecek kadar olduğu varsayımından yola çıkmaktadır (Sleep, 1975; Morton and Sleep, 1985; Phipps- Morgan, 1987). Dolayısıyla bu klasik modeller magma girdisinin beklenenden fazla olduğu ve tektonik aktivitenin etkisinin arttığı alanlarda sıcaklık modellemesinde yetersiz kalmaktadırlar. Bu klasik modellerin bir diğer açmazı da modellerin 2-boyutlu olması ve yapısal olarak 3-boyutlu olarak temsil edilebilen yavaş yayılan okyanus ortası sırtlarına uyalanamamasıdır. Jeolojik ve jeofizik çalışmalar magmatik ve tektonik süreçlerin segment uzunluğu boyunca değiştiğini ve bütün bir segmentin modellenebilmesi için 2-boyutlu yaklaşımların çok yeterli olmadığını göstermiştir (Phipps- Morgan, 1987; Shaw ve Lin, 1996). Bu makalede, yavaş yayılan okyanus ortası sırtlarında EMO oluşumuna neden olan koşulların anlaşılabilmesi için kararlı ısı modelleri yapılmıştır. Isı modellemesi Lucky Strike

segmentinin 3-boyutlu geometrisini gözönünde bulundurmakta ve değişen toplam magma girdisi (M), geometrisi yada eksen boyunca odaklanması (F), ve hidrotermal soğumanın gücü (Nu) parametrelerini kullanarak olası koşulları incelemektedir. Elde ettiğimiz sonuçlar özelde Lucky Strike segmenti genelde ise yavaş yayılan merkezlerdeki magma odalarının oluşabilme koşullarının anlaşılabilmesini sağlayacaktır.

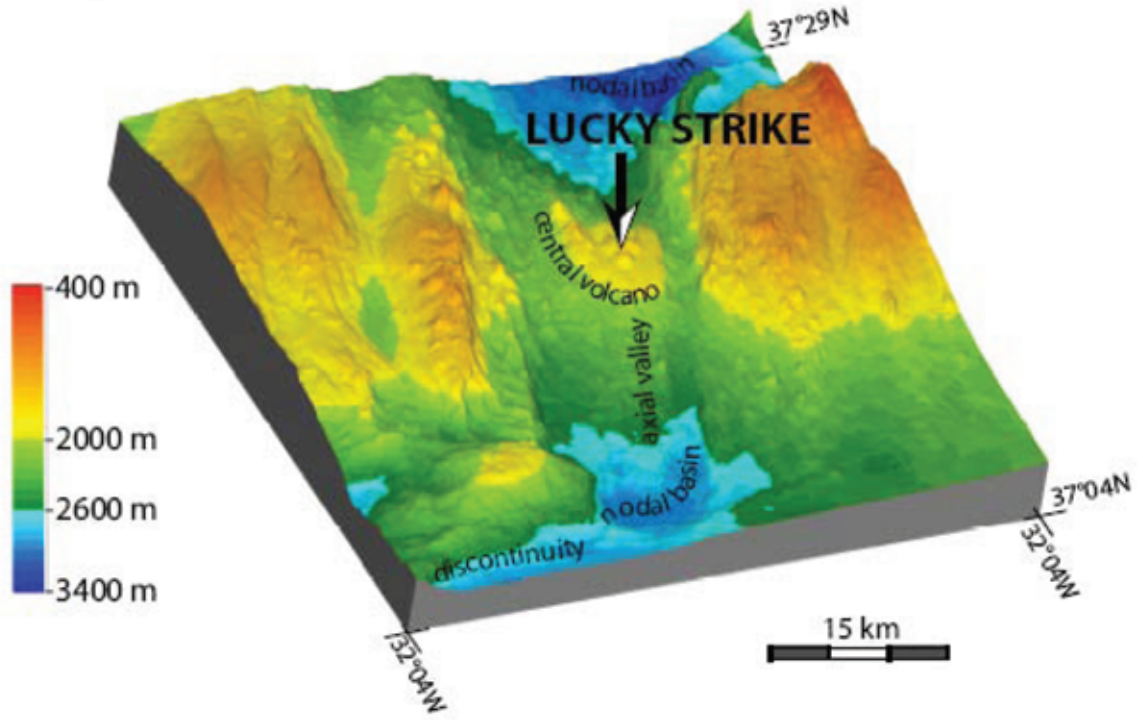
ÇALIŞMA ALANI

Lucky Strike Segmenti, ~ 70 km uzunluğunda 15-20 km genişliğinde ve derinliği 1550 m den 4000 m'lere varan aksenal bir vadiye sahiptir (Şekil 1). Düşey atımları 500 m'ye ulaşan iki ana fay, rift vadisini doğudan ve batıdan sınırlamaktadır. Ayrıca, düşey atımları 100m'den küçük birçok fay rift vadi tabanında bulunmakta ve volkanik etkinliğinin en yoğun olduğu yeri işaretlemektedir. Segment, gelişmiş aksenal vadiye sahip FAMOUS ($36^{\circ}50'N$) - North FAMOUS ($\sim 37^{\circ}N$) ve aksenal tepeye sahip Menez Gwen ($37^{\circ}50'N$) segmentleri arasında bir geçiş morfolojisi göstermektedir (Ondreas ve diğ., 1997; Detrick ve diğ., 1995). Bu geçiş morfolojisinin nedeni olarak segmentin Azore sıcak noktasına olan coğrafik yakınlığı gösterilmektedir (Detrick ve diğ., 1995).

Lucky Strike volkanı 9 x 15km'lik boyutuyla segmentin merkezinde yer almakta (Şekil 2) ve üç yerel zirveden oluşmaktadır. Bu alan pek çok irili ufaklı faylanmalarla kesilmiş ve sıcak su çıkışları da bu alanda keşfedilmiştir (Humphris ve diğ., 2002; Langmuir ve diğ., 1992; Fouquet ve diğ., 1994; Fouquet ve diğ., 1995; Langmuir ve diğ., 1997; Von Damm ve diğ., 1998). Bu su çıkışlarının sıcaklığı kara bacalarda $\sim 340^{\circ}C$ ve ak bacalarda ise $200-212^{\circ}C$ civarındadır (Cooper ve diğ., 2000; Von Damm ve diğ., 1998; Charlou ve diğ., 2000). Hidrotermal alanın altında yaklaşık 3.5 km derinde bir magma odası sismik yansımaya yöntemiyle keşfedilmiştir (Singh ve diğ., 2006; Combier, 2007). Yaklaşık 1.5kmx7km boyutundaki magma odasını gösteren sismik yansımaya seviyesinin altında ise sıcaklığın yüksek olduğuna işaret eden bir düşük hız bölgesi belirlenmiştir (Seher ve diğ., 2007; Seher ve diğ., 2010).



Şekil 1. Lucky Strike ve çevresinin bölgesel batimetri haritası (Escartin ve diğ., 2001)'den sadeleştirilerek alınmıştır.
 Figure 1. Regional bathymetry map of the Lucky Strike and adjacent segments, modified from Escartin et al. (2001).



Şekil 2. Lucky Strike segmentinin üç boyutlu batimetrik görüntüsü, siyah ok hidrotermal alanları göstermektedir (Mathilde Cannat kişisel görüşme, 2008).

Figure 2. 3D topographic view of Lucky Strike segment. Arrow shows the location of hydrothermal field (M. Cannat, Personal communication, 2008).

SAYISAL MODELLEME

Sayısal modellemede Phipps- Morgan ve Forsyth (1988)'in modeli temel olarak alınmıştır. Model, okyanus ortası sırtlarının geometrisi kaynaklı gelişen astenosferik akımların yüzeydeki sıcaklık dağılımına etkisini kapsamaktadır. Manto içerisinde yer alan astenosferik hareketler, okyanus ortası sıcaklık dağılımını denetlemektedirler. Astenosfer içerisindeki taşınımın hızı okyanus ortası sırtının açılma hızını belirlemekte ve bu sayede okyanus ortası sırtına ait sıcaklık dağılımı levhanın açılma hızıyla güçlü bir şekilde ilişkili olmaktadır. Modellerde elde ettiğimiz 3-boyutlu sıcaklık dağılımının temeli bu açılma hızı –sıcaklık dağılımı ilişkisine dayanmaktadır. Manto viskozite açısından uniform kabul edilmiş ve astenosferik hızlar yarı-analitik spektral yöntem ile çözülmüştür (Batchelor, 1967; Reid ve Jackson, 1981), Phipps- Morgan ve Forsyth (1988) modelinin en önemli avantajı 3-boyutlu geometrinin çözüme dahil edilebilmesidir. Bunun yanısıra hidrotermal soğuma,

iletim ile soğuma artırılarak tariflenmiş (Nu) ve magma dağılımının etkinliği, geometrisi sayısal modellemeye dahil edilmiştir. Sonlu farklar tekniği kullanılarak, değişen grid aralıkları için astenosferik akım kaynaklı sıcaklık dağılımı 3-boyutlu olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık dağılımının hesaplanması için kullanılan eşitlik Denklem 1'de verilmiştir ve denklem enerjinin korunumu prensibini esas almaktadır.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \rho c_p U \cdot \nabla T + \kappa \nabla^2 T \quad (1)$$

Denklemden p yoğunluk, C_p spesifik ısı kapasitesi, " T " sıcaklık, " t " zaman, " U " okyanus tabanının yayılma hızı, ve " k " ısı iletkenlik parametresini göstermektedir.

Model Yapısı

Modelimiz toplamda 4 okyanus ortası sırtı segmenti ve bunlarla ilişkili 3 transform fayı içeren $260 \times 260 \times 100 \text{ km}^3$ lük bir hacimden

oluşmaktadır (Şekil 3a). Alan kuzeyde Menez Gwen segmenti ve güneyde North Famous and Famous segmentlerini içermekte, bu sayede Lucky Strike segmentinin 3-boyutlu geometrisini uygun şekilde temsil etmektedir. Sonlu farklar yönteminde kullandığımız ağ geometrisi değişen grid aralıklarından oluşmaktadır. Grid aralıkları özellikle segmentlerin ve faylanmaların olduğu bölgelerde ve Luck Strike segmentinin merkezinde 0.1 km aralığına kadar sıklaştırılmıştır (Şekil 3b). Yan duvarlar adyabatik olarak tanımlanmıştır yani ısı geçişine izin verilmemektedir. Modelin üst duvarında sabit sıcaklık sınır koşulu kullanılmış ($z=0$ km, $T=0$ °C) ve alt duvarın sıcaklığı da mantonun sıcaklığına (T_m) eşitlenmiştir ($z=100$ km, $T=T_m$) (Tablo 1).

Yukarıda bahsedilen astenosferik akımlar kaynaklı oluşan sıcaklık dağılımına ek olarak, Lucky Strike segmenti için jeofizik çalışmalar sonucu öngörülen 6-km kabuk kalınlığına (Cannat ve diğ., 1999; Escartin ve diğ., 2001) karşılık gelen magma girdisi de modellemeye dahil edilmiştir. Bölgede yapılan gravite çalışmaları (Cannat ve diğ., 1999; Escartin ve diğ., 2001) LS segmenti boyunca ortalama kabuk kalınlığını 6km olarak öngörmektedir. Okyanus ortası sırtının merkezine Shaw ve Lin (1996)'da önerildiği gibi magma girdisini simgeleyen bir ısı kaynağı fonksiyonu ve faylanma kaynaklı soğumayı temsil eden soğuma parametresi yerleştirilmiştir. Isı kaynağı fonksiyonu (hs), yayılma hızı u , magma giriş sıcaklığı T_i , magmanın gizli ısı L_h , magma özgül ısı C_p , ve magmanın yerleştiği bölgenin kalınlığı parametreleri ile tanımlanmıştır (Denklem 2)

$$hs = u(T_i + L_h / C_p) / w \quad (2)$$

Isı kaynağı fonksiyonu, okyanus ortası sırt merkezindeki ısı geçişinin, sırt merkezinde yer aldığı düşünülen ince daykların getirdiği ısıya eşit olacağı varsayımıyla çalışmaktadır (Sleep, 1975; Phipps- Morgan ve Chen, 1993). Magmanın gizli ve özgül ısısının yalnızca magma girdisinin olduğu alanda açığa çıktığı öngörülmüş ve modellenmiştir. Bu sayede segmentteki magma dağıtımının sadece merkezdeki bu ince dayklar yoluyla yapıldığı varsayılmıştır ve bu varsayım daha önce yapılmış çalışmalarla uyum

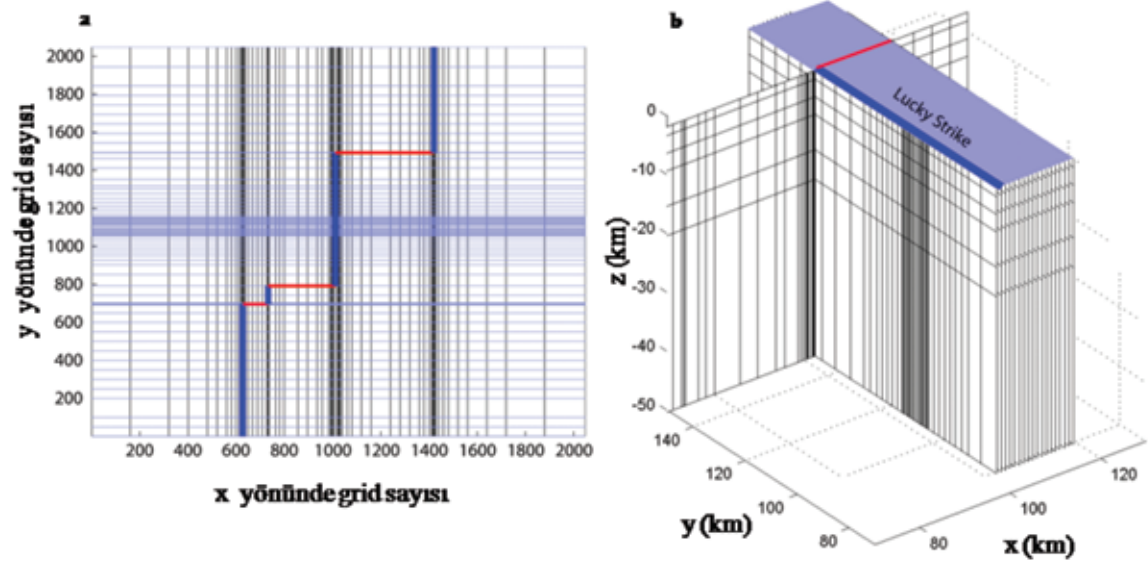
içerisindedir (Phipps- Morgan, 1987; Shaw ve Lin, 1996). Isı kaynağı fonksiyonunun değeri Denklem 1 ve Tablo 1'deki parametreler kullanılarak 15 MW/km olarak hesaplanmıştır.

Model Parametreleri

Yavaş yayılan okyanus ortası sırtlarında magma odalarının uzun ömürlü olabilme koşullarını araştırabilmek amacıyla, toplam magma girdisi (M), magmanın odaklanması (F) ve hidrotermal soğumanın gücü (Nu) parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Bütün modellerde Şekil 3'te verilen segment geometrisi ve Lucky Strike'ın güncel yayılma hızı olan 24 mm/yıl kullanılmıştır.

Magma girdisi geometrisi: Şekil 4 magma giriş bölgesinin geometrisini açık bir biçimde ortaya koymaktadır. Buna göre bu bölgenin genişliği bütün modeller için sabit tutulmuş (1 km) ancak üst yüzey derinliği (h_d) 3 km, 3.5 km ve 4 km olarak değiştirilmiştir. Bu değerler Lucky Strike segmentinde keşfedilen EMO'nun yaklaşık ~3.5 km olan derinliği ile uyum içerisindedir (Singh ve diğ., 2006; Comber, 2007). M=1 kararlı durumda beklenen magma giriş miktarını temsil etmekte ve 6 km kalınlığındaki kabuğu Lucky Strike segmentinin boyu olan 70 km boyunca oluşturabilecek yeterlilikteki magma girdisini oluşturmaktadır. Magmanın giriş yaptığı alanın uzunluğu okyanus ortası sırtı boyunca geometrik odaklanma parametresi F ile verilmiş ve segmentin diğer alanlarında magma girdisi olmadığı yani birikimin bütünüyle tektonik olduğu varsayılmıştır.

Magma girdisi ve odaklanması: Şekil 5 model yapısını M=1 ve değişen odaklanma geometrisine bağlı olarak göstermektedir. Bu örnekte aynı zamanda magma dağılımının bir fonksiyonu olarak değerlendirilebilecek, kabuki kalınlığı değişiminin, gravite verilerinden elde edilmiş fonksiyonu da yer almaktadır (Escartin ve diğ., 2001). Gravite verisi segment merkezinde kabuk kalınlığının, segment uçlarından yaklaşık 1.7 km fazla olduğunu göstermektedir. Kabuk kalınlığındaki bu fark segmente sağlanan toplam magma girdisinin yaklaşık olarak %28 arttığına işaret etmektedir. Bu noktadan yola çıkarak magma girdisi parametresini 0.1-2 arasında değiştirerek, segmentin beklenenden az yada daha



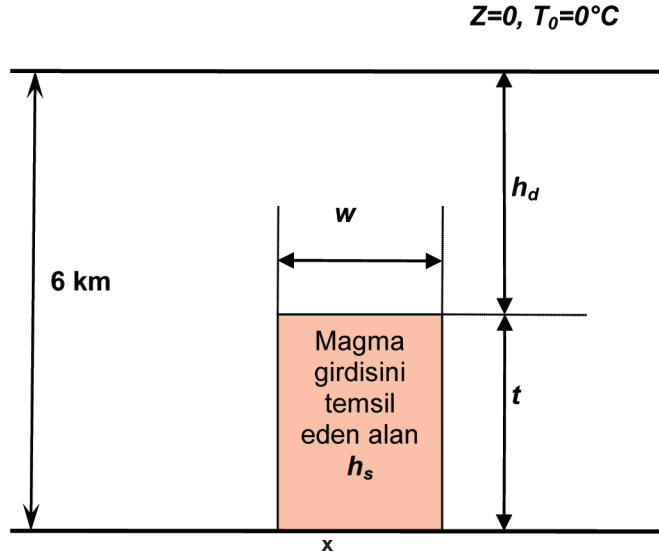
Şekil 3a. Sıcaklık modellemesi için kullanılan hesaplama geometrisi. Koyu mavi çizgiler, yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla, Menez Gwen, Lucky Strike, North Famous, ve Famous segmentlerini göstermektedir. Kırmızı kalın çizgiler de bu segmentlerle ilişkili transform fayları belirtmektedirler (b) Lucky Strike Segmenti boyunca oluşturulan grid geometrisi. Sonlu farklar yöntemi için oluşturulan gridler Lucky Strike segmenti merkezine doğru yoğunlaştırılmışlardır. Şekil 6-8 için kullanılan grid geometrisi ve gösterilen alan buradaki modelin aynısıdır.

Figure 3. (a) Calculation geometry and grids for thermal calculations. Thick blue lines are, from North to South, the Menez Gwen, Lucky Strike, and North Famous, and Famous segments, and red thick lines are associated offsets (b) Finite difference grids at the along-axis slice of Lucky Strike Segment. Finite difference grids are densest in the vicinity of the Lucky Strike segment center. Same slice is used for the Figures 6 through 8.

Çizelge 1. Model parametreleri

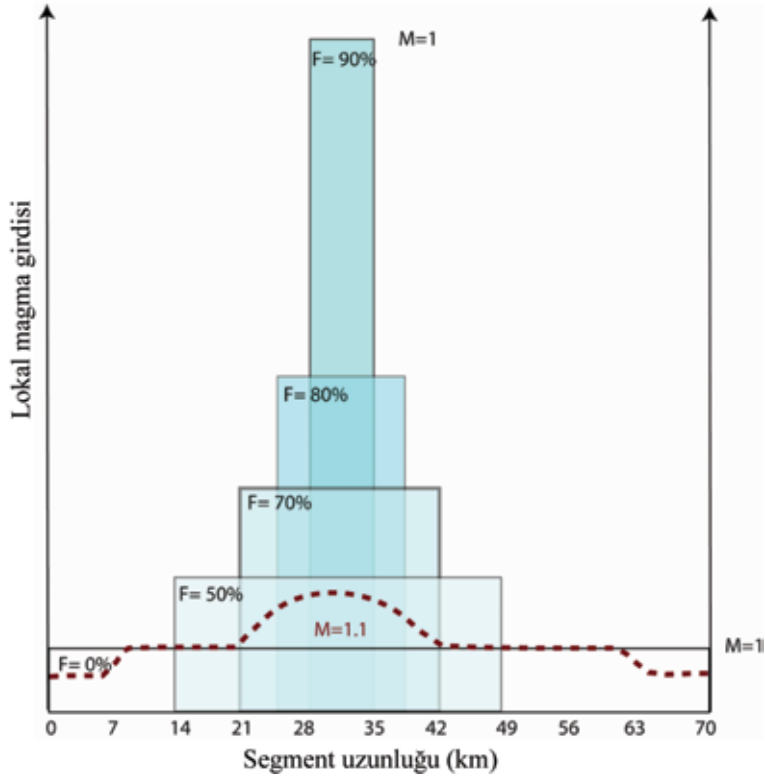
Table 1. Model Parameters for thermal calculations.

Parametre	Tanımı	Değeri	BİRİMİ
u	Yayıma hızı	24	mm/yr
L	Segment uzunluğu	Değişken	km
T _i	Magma giriş sıcaklığı	1150	°C
T _m	Manto sıcaklığı	1350	°C
L_h	Magma gizli ısı	7.5x10 ⁵	J/kg
k	Isıl yayınma katsayısı	10-6	m ² /s
ρ _c , ρ _m	Kabuk ve mantonun yoğunluğu	2900, 3300	kg/m ³
w	Magma giriş alanının genişliği	1	km
F %	Magma giriş alanının segment boyunca uzunluğu / segment uzunluğu	0-95	
M	Magma giriş miktarı	0.1-2	
Nu	Hidrotermal soğuma parametresi	8-10	Nu
hcdepth	Hidrotermal soğuma derinliği	3, 3.5, 4	km
hctemp	Hidrotermal sıcaklık limiti	500	°C



Şekil 4. Model geometrisi. w magma giriş fonksiyonunun (h_s) genişliği, h_d magma giriş derinliği ve t magma girdisinin kalınlığını göstermektedir.

Figure 4. Cartoon represents the model. w is the width of emplacement of heat source (h_s), h_d is the intrusion depth and t is the thickness of the emplacement.



Şekil 5. Farklı odaklanma değerleri için (F), yerel magma girdisinin segment uzunluğuna bağlı olarak değişimi. $M=1$ kararlı durumdaki magma girdisini göstermekte ve 70 km uzunluğundaki LS segmenti için 6 km kalınlığında kabuk oluşturabilecek hacme sahip değeri temsil etmektedir. Kesikli çizgi ise LS segmentindeki kabuk kalınlığı değişimlerini içeren odaklanma parametresinin fonksiyonudur.

Figure 5. Melt focusing F assuming for a constant melt supply ($M=1$). $M=1$ is steady-state melt supply that is necessary to produce a crustal thickness of 6 km over the whole length of the Lucky Strike segment (70 km). Dashed line corresponds to melt supply geometry for a melt supply $M=1.1$, in order to simulate the crustal thickness variations derived from gravity data.

fazla magma girdisi aldığı durumların modellenmesi hedeflendi. Aynı zamanda magma girdisi tüm segment boyunca eşit bir şekilde dağılabileceği gibi, segmentin belirli kısımlarına odaklanarak da dağılabileceğinden F odaklanma parametresiyle bunu yaratan koşullar modele dahil edildi. Örneğin 70 km'lik bir LS segmenti için eğer tüm segment eşit şekilde magma alıyorsa odaklanma parametresi $F=0$, ya da sadece segment merkezinde 3.5 km'lik bir alan magma girdisinden etkileniyorsa $F=0.95$ olarak tanımlandı. LS magma odasının segment boyunca uzunluğu yaklaşık 7km olduğundan bu alan için yüksek magma odaklanması ($F\sim 0.90$) durumu ile karşı karşıya olabileceğimiz düşünülebilir.

Hidrotermal soğuma: Modellemede okyanus ortası sirtlarındaki soğumanın en önemli kaynaklarından biri olan hidrotermal taşınım, ısı iletilenlik parametresinin bir faktörle çarpılarak artırılmasıyla simgelenmiştir (Nusselt Sayısı, Nu). Literatürde taşınım ısı transferinin, iletimle ısı transferine olan oranı olarak bilinen Nusselt sayısı, okyanus ortası sirtlarında geçirgenliğe bağlı olarak yersel ve zamansal olarak değiştiği için, çalışma kapsamında olası değerleri geniş bir aralıkta tutulmuştur ($Nu=6-10$). Bu değerler modellerde Nusselt sayısının ortalama değerlerine karşılık gelmektedir ve zaman içerisinde küçük salınımlar gösterebileceği öngörülmüştür. Modellemede kullanılan Nusselt sayısı aralığı daha önce yapılmış çalışmalarla uyum içerisindedir (Phipps- Morgan, 1987; Lin and Parmentier, 1989; Shaw and Lin, 1996). Hidrotermal dolaşımın olduğu alan iki koşulla belirlenmiştir. İlk koşul, hidrotermal akışkanın inebileceği derinliğin basınç bağımlı olması ve en fazla 6km'ye kadar ulaşabilmesidir. Bu değer daha önceki çalışmalarda elde edilen derinliklerle uyumludur (Shaw ve Lin, 1996). İkinci koşul ise kayaçların belirli sıcaklıkların üzerinde geçirimsiz hale gelmeleri ve akışkanı iletememeleridir ki bu da 750°C üzerindeki sıcaklıklar için geçerlidir.

Sıcaklık yapısı ve olası magma depolanma bölgeleri: 1100°C eş sıcaklık eğrisinin belirlenmesi

Petrolojik çalışmalar, Doğu Pasifik Yükselimi'nde, lavların sıcaklıklarının 1170°-

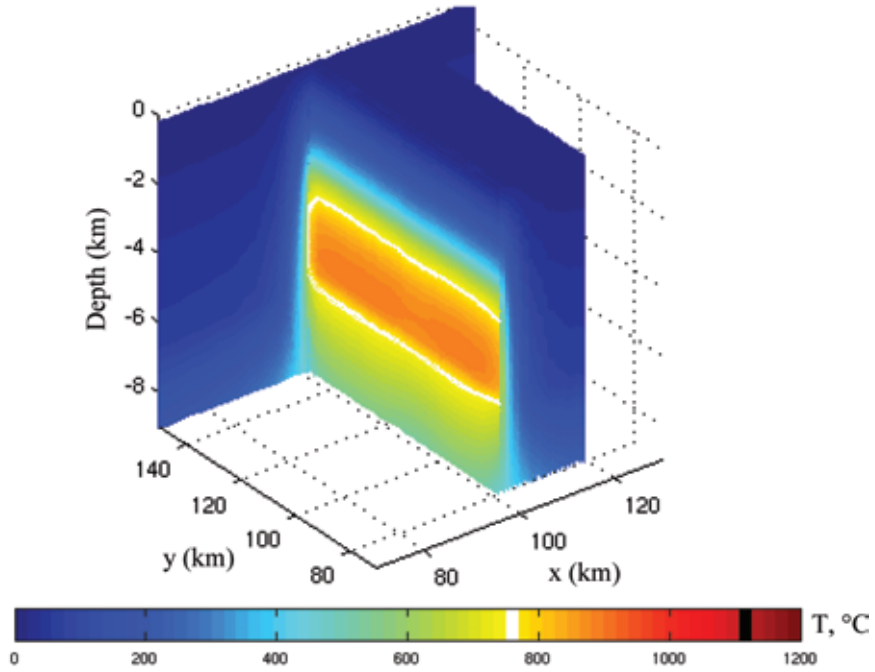
1190°C aralığında olduğuna işaret etmektedir. Bu değer, magma odalarındaki sıcaklıktan bir miktar daha düşük olsada, ortalama sıcaklık değerinin 1100°C'den daha büyük olduğu düşünülmektedir (Wilson ve diğ., 1988). Bu nedenle modellerimizde magma odalarının oluşabileceği alanları temsil etmek üzere 1100°C eş sıcaklık değerlerini belirlendi ve bu alanların magma taşıma potansiyeli olacağı öngörüldü. Bu alanlar astenosferden ayrı bir bölge olarak kabuk içinde yer alabileceği gibi, astenosferle bir bağda bulunacak şekilde bulunabilirler. Bu çalışma kapsamında, 1100°C bölgesinin geometrisi (derinliği, genişliği, hacmi) hesaplatılarak magma odalarının varolabilme koşulları incelenmiştir.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Daha önce belirtildiği gibi, artan ve azalan magmatik girişi temsil etmek üzere $M=0.1$ 'den $M=2$ 'ye değişen magma girdileri kullanılmıştır. Bunun yanısıra değişen magma girdi geometrisini temsil etmek üzere $F=0-0.95$ aralığında magma odaklanması modellenmiş ve bunların neden olduğu sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Bu parameterlerin olası magma odalarının oluşumuna etkisini gösterebilmek için üç ana temsili modelimizi makale kapsamında göstermeyi seçtik: 1) Odaklanmamış bir magma dağıtımı ($F=0\%$, $M=1$) (Şekil 6). Yani segment boyunca magma girdisi eşit bir şekilde dağıtılmıştır, 2) Orta derecede odaklanmış magma girdisi ($F=70\%$, $M=1$) (Şekil 7) ve 3) Magma girdisinin LS kabuk yapısına uyumlu bir fonksiyon halinde tanımlanması durumu (Şekil 8).

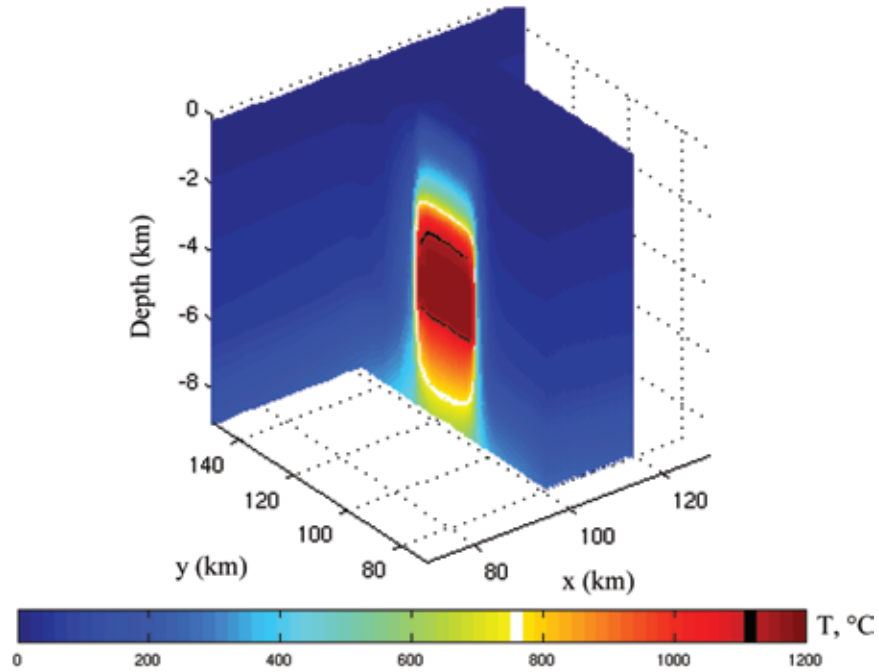
Odaklanmamış bir magma girdisi durumunda sıcaklık dağılımının nasıl olduğu Şekil 6'da gösterilmiştir. Hidrotermal soğuma parametresinin $Nu=6$ alındığı modelde en büyük sıcaklıklar 780°C olarak izlenmiştir ve kırılğan-sünek geçişin yaşandığı 750°C (Hirth ve diğ., 1998) eş sıcaklık eğrisinin en küçük derinliği 4.1km de yer almaktadır. Sıcaklık değerleri 1100°C değerine ulaşmadığından bu koşul altında, klasik termal modellerin de tahmin ettiği üzere magma odasını oluşturabilecek koşullar mevcut değildir.

İlk modelle aynı oranda toplam magma girdisi içeren, ancak bu sefer magma girdisinin



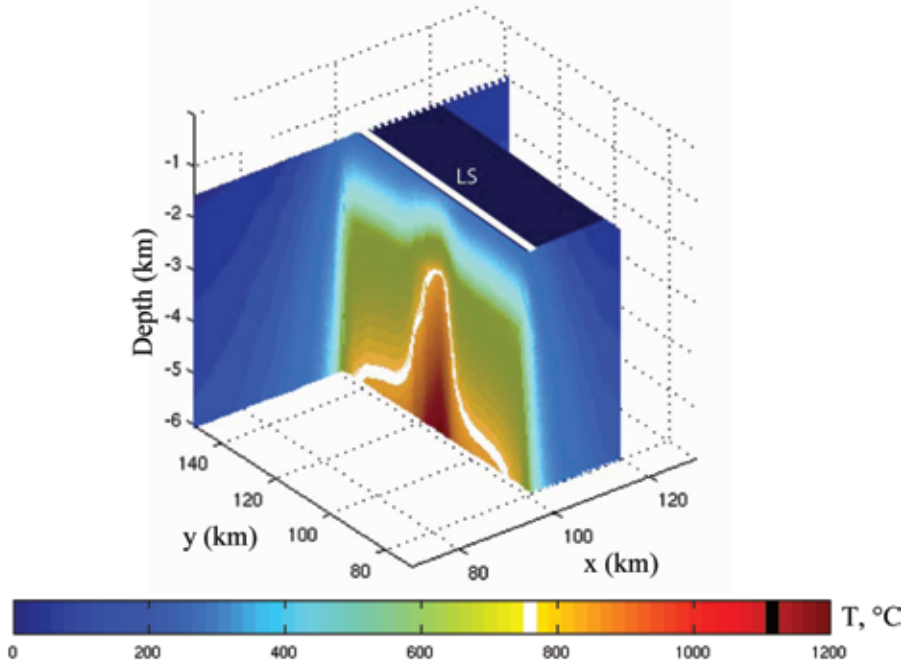
Şekil 6. 3-boyutlu sıcaklık modellemesi $hd=3\text{km}$, $M=1$, $F=0$ ve $Nu=6$. Bütün segment boyunca magmatik giriş eşit olarak dağıtılmıştır. 750°C eşsıcaklık eğrisi kalın beyaz çizgiyle gösterilmektedir.

Figure 6. 3-D thermal model for $hd=3\text{km}$, $M=1$, $F=0$ and $Nu=6$. Uniform melt supply through the whole segment. The 750°C isotherm is indicated by a white thick contour.



Şekil 7. 3-boyutlu sıcaklık modellemesi $hd=3\text{km}$, $M=1$, $F=70\%$, ve $Nu=6$. Eşit magma girdisine rağmen odaklanmanın olduğu bu modelde $> 1100^\circ\text{C}$ sıcaklıklara ulaşılmış ve magma barındırabilecek potansiyel hacim tespit edilmiştir. Eş sıcaklık eğrileri 80° açılara ulaşmaktadır.

Figure 7. 3-D thermal model for $hd=3\text{km}$, $M=1$, $F=70\%$, and $Nu=6$. There is a possibility to host an AMC at the segment center with the increasing temperature of $> 1100^\circ\text{C}$. Isotherms dip up to 80° in the model.



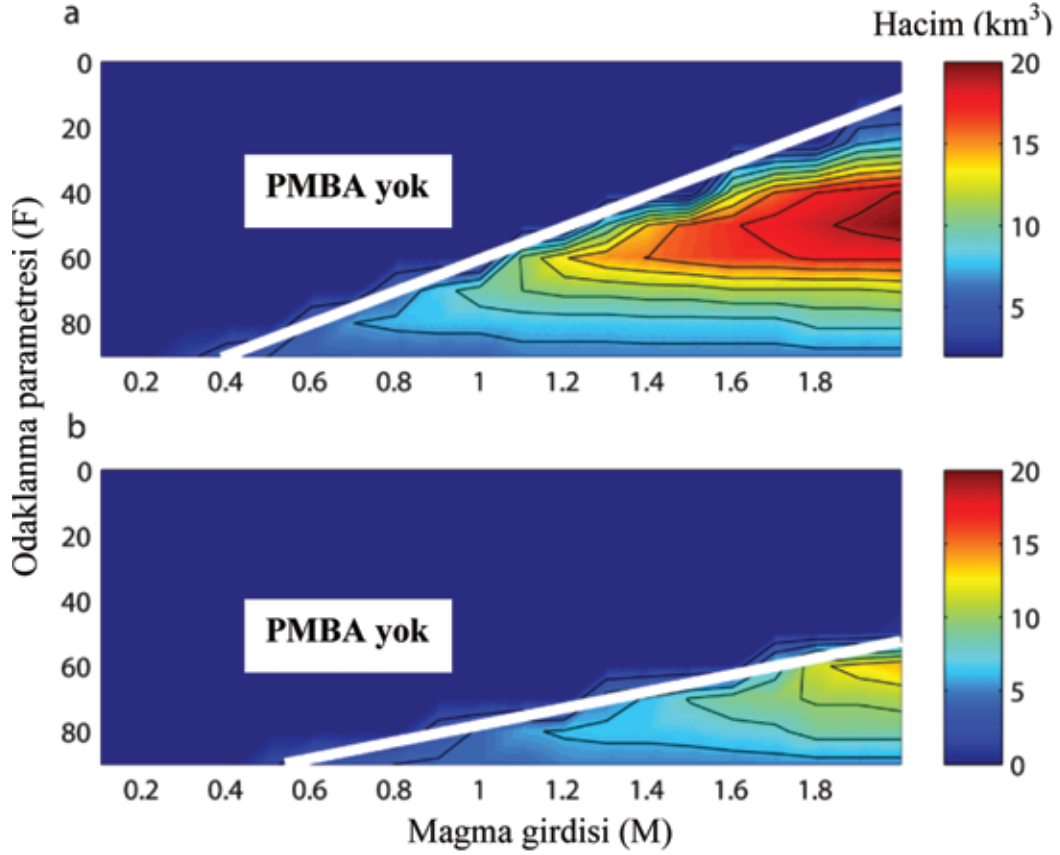
Şekil 8. 3-boyutlu sıcaklık modellemesi. Odaklanma parametresinin, gravite çalışmalarıyla tespit edilen LS kabuk yapısının bir fonksiyonu olarak tanımlanmasıyla elde edilmiştir ($M=1.1$). Eşsıcaklık eğrileri 45° 'lik eğimlere ulaşmakta ve sıcaklık yapısı kabuk içerisinde bir EMO'ya müsade etmemektedir.

Figure 8. 3-D thermal model where heat source function model that derived from Lucky Strike crustal thickness ($M=1.1$) indicated from the gravity were used. Isotherms dip up to 45° , and temperature structure precludes a stable AMC within the crust.

odaklanmış olduğu bir diğer modelimiz de Şekil 7'de verilmektedir. $F=70\%$ olarak seçilen modelde segment merkezinde 14 km^2 'lik bir alan magma girdisinden etkilenirken segmentin diğer kısımlarına magma ulaşmamaktadır. Elde ettiğimiz sıcaklık dağılımına bakıldığında, segment merkezinde 1100°C üzerinde sıcaklığa sahip bir hacim izlenmekte ve sistem bir magma odasını barındırabilecek potansiyele sahip gözükmemektedir. Bu alan 3-6 km arası derinliklerde yer almakta ve çok dik açılı termal gradyan ile çevrelenmektedir. Bu sıcaklık dağılımını bize aynı oranda magma girdisine rağmen, odaklanma parametresinin magma odasını oluşturabilme gücünü göstermektedir. Üçüncü modelimiz, LS segmentinde gravite verileri ile izlenen kabuk yapısının bir fonksiyon halinde tanımlanarak, magma giriş geometrisinin tanımlanmasıyla elde edilmiştir. Eşsıcaklık eğrilerinin açısı 45° 'leri bulmakta ve en büyük sıcaklıklar $\sim 980^\circ\text{C}$ olarak izlenmektedir. Dolayısıyla magma odasının oluşmasına izin verebilecek koşullara ($T > 1100^\circ\text{C}$) rastlanmamıştır.

Bu çalışma kapsamında yapılan modellemelerin en önemli amaçlarından biri, yavaş yayılan okyanus ortası merkezlerinde magma odalarının uzun ömürlü olabileceği alanların ve koşulların araştırılmasıdır. Daha öncede belirtildiği gibi bu alanların tespiti için modellerimizde 1100°C eşsıcaklık eğrilerinin yerlerini araştırmıştık. Bu bölgeleri potansiyel magma birikim alanı (PMBA) olarak adlandırdık ve bütün model çalışmalarımızda bu alanın, eğer mevcut ise, hacmini, derinliğini ve kalınlığını hesapladık.

Derinlik ve kalınlık değerleri ne kadar bilgilendirici olsa da, hepsini içinde barındıran hacim bilgisi çok daha önemli sonuçlara ulaşabilmemizi sağlamaktadır. Şekil 9 PMBA'nın hacminin toplam magma girdisi M ve odaklanması F parametrelerine bağlı olarak değişimini göstermektedir. Modellerden anlaşıldığı üzere, toplam magma girdisinin kararlı halden çok küçük olduğu durumlarda bile ($M < 1$), magma odasını oluşturabilecek en önemli faktör magmatik girişin odaklanmasıdır (F). Gösterilen iki modelde



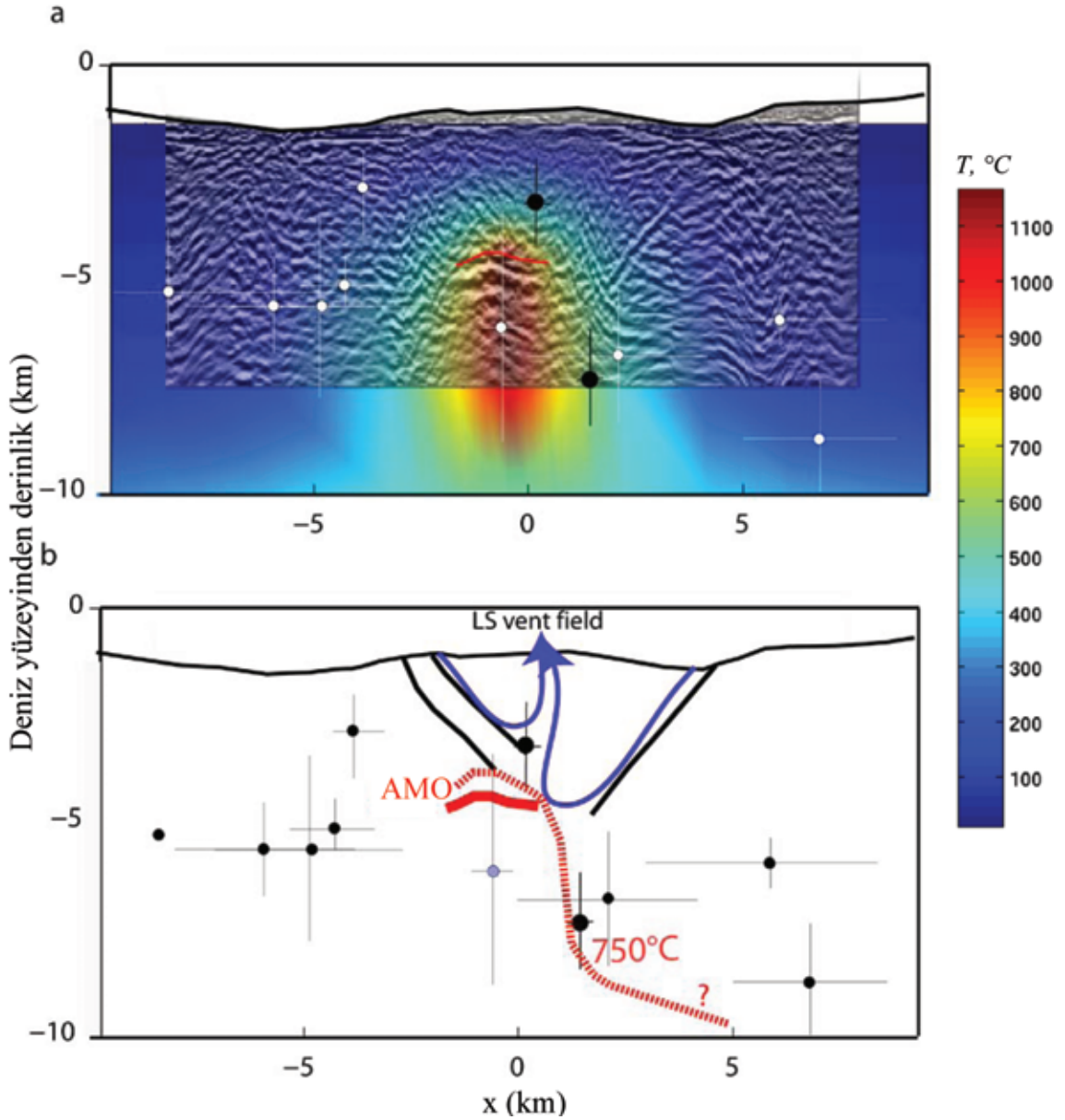
Şekil 9. PMBA için toplam magma girdisi ve odaklanmaya bağlı olarak hacim hesaplaması. (a) $Nu=6$ and, (b) $Nu=10$. Beyaz kalın çizgi, EMO'nun oluşabileceği ve oluşamayacağı koşulları ayırmaktadır.
 Figure. 9 Volume calculation for the PMBA with respect to the melt supply rate M and focusing F . (a) $=6$ and, (b) $=10$. White solid lines show the transition from potentially durable to no magma chamber.

(Şekil 9a ve b) hidrotermal soğuma parametresi $Nu=6$ ve 10 olarak alınmıştır. Hidrotermal soğuma parametresinin etkisi çok açık bir şekilde izlenebilmekte ve özellikle bu etkinin yüksek odaklanmalı modellerde baskın olduğu anlaşılabilir. Nu değerlerindeki artış, magma odasının varolma koşullarını ve hacmini oldukça değiştirebilmektedir. Örneğin, kararlı durumdaki magma girdisi $M=1$ ve $F=70\%$ odaklanma değeri, $Nu=6$ iken magma odası oluşumu izlenebilmekte iken (Şekil 9a), hidrotermal soğumanın etkisi arttırıldığında ($Nu=10$) magma odasını oluşturabilecek alanlar izlenmemektedir (Şekil 9b).

Şekil 10, hesaplattığımız temsili bir sıcaklık modelinin üzerine, Lucky Strike merkezinde tespit edilen mikrodepremler (Dusunur, 2008;Dusunur

ve diğ., 2009) ve EMO sismik yansıma yüzeyini gösteren sismik yansıma verisinin (Singh ve diğ., 2006; Combier, 2007) üst üste çizdirilmesiyle elde edilmiştir. Sıcaklık modellemesinin yanı sıra, depremsellik de kırılğan-sünek yapıyı ayırabilen bir gösterge olduğundan deprem dağılımını, sıcaklıkla ilişkilendirmek mümkündür. Hem sıcaklık modellemeleri hemde depremsellik verileri ortak bir biçimde kabuğun kırılğan davrandığı alanları işaret etmekte ve yüksek ısıl gradyanları göstermektedirler.

Sıcaklık modellemelerimiz kararlı durum çözümlerini temsil ettiğinden, yavaş yayılan okyanus ortası sırtlarında uzun süreli duraylılığı olabilecek magma odalarını oluşturan koşulları yansıtmaktadırlar. Model sonuçlarımıza göre EMO'lar ancak yüksek magma odaklanmasının olduğu



Şekil 10. (a) LS segmenti için hesaplatılmış 3-boyutlu sıcaklık dağılımı ($F=80\%$, $M=1$, $Nu=10$). Kırmızı kalın çizgi sismik yansıma yöntemiyle keşfedilmiş EMO yansıtıcı yüzeyini göstermektedir (Singh ve diğ., 2006; Combier, 2007). Siyah daireler LS segmenti yakınındaki mikrodprem aktivitesini ve ilişkili hata değerlerini göstermektedir. Beyaz daireler ise segment merkezinden uzaktaki depremlerin projeksiyonu ile elde edilmiştir (Dusunur ve diğ., 2009) (b) Yorumlanmış sismik kesit. Kırmızı düz çizgi EMO'yu ve onun temsil ettiği $> 1100^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarını göstermektedir. Kırmızı kesikli çizgi kırılman-sünek davranış ayrımını 750°C eşsıcaklık eğrisinin olduğu alandır. Aktif faylanmalar magma odasının altına kadar izlenebilmektedir (Singh ve diğ., 2006; Combier, 2007).

Figure 10. (a) Calculated temperature structure across the axis and at the center of the Lucky Strike segment ($F=80\%$, $M=1$, $Nu=10$). Red thin line corresponds to the imaged magma chamber (AMC) (Singh et al., 2006; Combier, 2007). Black circles are earthquakes close to the AMC, with the corresponding location uncertainties. White circles correspond to seismicity along the segment away from the AMC, White circles correspond to seismicity along the segment away from the AMC or off plane (Dusunur et al., 2009), (b) Interpreted section with elements which indicate the temperatures. Red line shows the AMC corresponding temperatures of $> 1100^{\circ}\text{C}$. Red dashed line shows the brittle to plastic transition corresponding to the 750°C isotherm. Active bounding faults are imaged to the depth of or below the AMC (Singh et al., 2006; Combier, 2007).

alanlarda oluşabilir ve duraylılıklarını koruyabilirler (Dusunur, 2008; Dusunur, Cannat ve Escartin, 2008). Modellerde artan ya da azalan toplam magma girdisinin ve hidrotermal soğumanın etkinliğinin önemi de açık bir biçimde izlenmekle birlikte ana faktörün magmanın segmente giriş geometrisi olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, literatürde sözü edilen kısa ömürlü magma odalarının (Phipps- Morgan ve Chen, 1993), daha uzun ömürlü kararlı magma odalarına dönüşebilme koşulu da bu odaklanma parametresiyle ilişkilidir. Modellerimizce tahmin edilen bu odaklanma aslında LS segmentinde gravite verileriyle elde edilen kabuk kalınlaşması ile desteklenmektedir (Cannat ve diğ., 1999; Escartin ve diğ., 2001). Çalışma alanında günümüzde izlenen kabuk kalınlığı dağılımının oluşabilmesi için, LS segmentinde güçlü bir magma odaklanması oluşması gerektiğini göstermektedir. Sıcaklık eğrilerinde izlenen yüksek termal gradyanlar (> 60°), hızlı yayılan okyanus ortası sırtlarında elde edilenlerle kıyaslanabilecek düzeydedir (Dunn ve Toomey., 2000). Bu benzerlik yavaş yayılan merkezlerde güçlü olan hidrotermal soğumanın bir sonucu olarak ortaya çıkmış olabilir.

KAYNAKLAR

- Batchelor, G.K., 1967. An introduction to fluid dynamics, Cambridge University Press, 615.
- Cannat, M., Briais, A., Deplus, C., Escartin, J., Georgen, J., Lin, J., Mercoiriev, S., Meyzen, C. Muller, M., Puliquen, G., Rabain, A., Silva, P., 1999. Mid-Atlantic ridge – Azores hotspot interactions: Along-axis migration of a hotspot-derived magmatic pulse 14 to 4 Myrs ago, *Earth Planet Sci. Lett.*, 173, 257-269.
- Cannat, M, Kişisel görüşme, 2008.
- Charlou, J.L., Donval, J.-P., Douville, E., Jean-Baptiste, P., Radford-Knoery, J., Fouquet, Y., Dapoigny, A., Stievenard, M., 2000. Compared geochemical signatures and the evolution of Menez Gwen (37°50'N) and Lucky Strike (37°17'N) hydrothermal fluids, south of the Azores Triple Junction on the Mid-Atlantic Ridge, *Chem. Geol.*, 171, 49-75.
- Comber., V., 2007. Mid-Ocean Ridge Processes: Insights from 3D reflection seismics at the 9°N OSC on the East Pacific Rise, and the Lucky Strike volcano on the Mid-Atlantic Ridge. PhD thesis, Institut de Physique du Globe de Paris, France, 2007.
- Cooper, M. J., Elderfield, H., Schultz, A., 2000. Diffuse hydrothermal fluids from Lucky Strike hydrothermal vent field: Evidence for a shallow conductively heated system, *J. Geophys. Res.*, 105, 19369-19376.
- Detrick, R.S., Needham, H.D., Renard, V., 1995. Gravity anomalies and crustal thickness variations along the Mid-Atlantic ridge between 33°N and 40°N, *J. Geophys. Res.*, 100, 3767-3787.
- Dunn, R.A., ve Toomey, D.R., 2000. Three-dimensional seismic structure and physical properties of the crust and shallow mantle beneath the East Pacific Rise at 9°30'N, *J. Geophys. Res.*, 105, B10, 23537-23555.
- Düşünür, D., Cannat, M., Escartin, J., 2008. Thermal Structure of Lucky Strike Segment, Mid-Atlantic Ridge: indications from microearthquakes and thermal modeling, General Assembly and Congress European Geoscience Union abstract, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-05366.
- Düşünür, D.2008. Thermal structure of Mid-Ocean Ridges (Lucky Strike, Mid-Atlantic Ridge) and magma chambers. PhD thesis, Institut de Physique du Globe de Paris, France, 2008.
- Düşünür, J. Escartin, V. Comber, T. Seher, W. Crawford, M. Cannat, S. C. Singh, L. M. Matias, ve J. M. Miranda, 2009. Seismological constraints on the thermal structure along the Lucky Strike segment (Mid-Atlantic Ridge) and interaction of tectonic and magmatic processes around the magma chamber. *Marine Geophysical Researches*, 30: 105-120, June 2009. doi: 10.1007/s11001-009-9071-3.

- Escartin, J., Cannat, M., Pouliquen, G., Rabain, A., 2001. Crustal thickness of V-shaped ridges south of the Azores; interaction of the Mid-Atlantic Ridge (36 degrees -39 degrees N) and the Azores hot spot, *J. Geophys. Res.*, 106, 21719-21735.
- Fouquet, Y., Ondreas, H., Charlou, J.-L., Donval, J.-P., Radford-Knoery, J., 1995. Atlantic lava lakes and hot vents, *Nature*, 377, 201-205.
- Fouquet, Y., Charlou, J.-L., Radford-Knoery, J., Donval, J.-P., Pelle, H., Ondreas, H., Lourenco, N., Segonzac, M., Tivey, M. K., 1994. Geological setting and comparison of the Menez-Gwen and Lucky Strike vent fields at 37°17'N and 37°50'N on the Mid-Atlantic Ridge (MAR, DIVA 1 diving cruise), *Eos Trans. AGU*, 75(44), Fall Meet. Suppl., Abstract.
- Hirth, G., J. Escartin, J. and Lin, J., 1998. The rheology of the lower oceanic crust: implications for lithospheric extension at slow-spreading ridges, in *Magma-tism and faulting at mid-ocean ridges*, W. R. Buck et al. Eds., *Geophysical Monograph* 106, 267-289, 1998.
- Humphris, S. E., Fornari, D.J., Scheirer, D.S., German, C.R., Parson, L.M., 2002. Geotectonic setting of hydrothermal activity on the summit of Lucky Strike seamount (37°17'N, Mid-Atlantic Ridge), *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3, 8, 10.1029/2001GC000284.
- Langmuir, C.H., G. Klinkhammer, H. Bougault, and Shipboard Scientific Party, 1992. FAZAR Cruise Report, Lamont-Doherty Earth Observatory, Palisades, N.Y.
- Langmuir, C., Humphris S., Fornari, D., C. Van Dover, K. Von Damm, Tivey, M. K., Colodner, D., Charlou, J., Desonie, D., Wilson, C., Fouquet, Y., Klinkhammer G., Bougault, H., 1997. Hydrothermal vents near a mantle hot spot: the Lucky Strike vent field at 37°N on the Mid-Atlantic Ridge, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 148, 69-91.
- Lin, J. and Parmentier, E.M., 1989. Mechanisms of lithospheric extension at mid-ocean ridges, *Geophys. J. Int.*, 96, 1-22.
- Morton L., and Sleep, N.H., 1985. Geology and offshore resources of Pacific Island Arc-Tonga region. In: D.W. Scholl and T.L. Vallier, Editors, *Geology and offshore resources of Pacific island arcs-Tonga region*, Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Science Series, 2, Circum Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Houston, TX ,441-453.
- Ondreas, H., Fouquet, Y., Voisset, M., Radford-Knoery, J., 1997. Detailed study of three contiguous segments of the Mid-Atlantic Ridge, South of the Azores (37°N to 38°30'N), using acoustic imaging coupled with submersible observations, *Mar. Geophys., Res.*, 19.
- Phipps-Morgan, J., 1987. Melt migration beneath mid-ocean spreading centers, *Geophys. Res. Lett.*, 14, 1238-1241.
- Phipps-Morgan, J., ve Forsyth, D.W., 1988. Three-dimensional flow and temperature perturbations due to a transform offset: Effects on oceanic crustal and upper-mantle structure, *J. Geophys. Res.*, 93, 2955-2966.
- Phipps-Morgan, J., ve Chen, J.Y., 1993. Dependence of ridge-axis morphology on magma supply and spreading rate, *Nature*, 364, 706-708.
- Reid, I., ve Jackson, R., 1981. Oceanic spreading rate and crustal thickness, *Mar. Geophys. Res.*, 5, 165-172.
- Seher, T., Crawford, W., Singh, S., Cannat, M., Combier, V., Carton, H., 2007. Seismic velocity structure of the upper oceanic crust beneath the Lucky Strike hydrothermal vent field (37.3°N Mid-Atlantic Ridge), General Assembly and Congress European Geoscience Union, Austria Center Vienna, Abstract.
- Seher, T., Crawford, W., Singh, S., Cannat, M., Combier, V., and Düşünür, D., 2010. Crustal velocity structure of the Lucky Strike segment of the Mid-Atlantic Ridge at 37°N from seismic refraction measurements. *Journal of Geophysi-*

- cal Research (Solid Earth), 115, March 2010. doi: 10.1029/2009JB006650.
- Shaw, W.J., ve Lin, J., 1996. Models of ocean ridge lithospheric deformation: Dependence on crustal thickness, spreading rate, and segmentation, *J. Geophys. Res.*, 101, 17977-17993.
- Sleep, H., 1975. Formation of ocean crust: some thermal constraints, *J. Geophys. Res.*, 80, 4037-4042.
- Singh, S., Crawford, W.C., Cartoon, H., Seher, T., Combier, V., Cannat, M., Canales, J.P., Dusunur, D., Escartin, J., Miranda, M., 2006. Discovery of a magma chamber and faults beneath a Mid-Atlantic Ridge hydrothermal field, *Nature*, 442, 1029-1032.
- Von Damm, K. L., Bray, A. M., Buttermore, L. G., ve Oosting, S. E., 1998. The geochemical controls on vent fluids from the Lucky Strike vent field, Mid-Atlantic Ridge, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 160, 521-536.
- Wilson, D.S., Clague, D.A, Sleep, N.H., ve Morton, J.L., 1988. Implications of magma convection for the size and temperature of magma chambers at fast spreading ridges, *J. Geophys. Res.*, 93, 11974-11984.

